

Analogien



Karlsruher Institut für Technologie

1. Das Problem
2. Analogien
3. Historische Umwege

Umfang des physikalischen Wissens wächst unaufhaltsam –
Unterrichtszeit bleibt konstant

Physik ist eines der unbeliebtesten Fächer.

Das Wissens müsste ständig neu aufbereitet werden.

Das Verbesserungspotenzial ist groß.

Zusammenstreichen der Fachsprache

Ausnutzen von Analogien

Beseitigen von historischen Umwegen

1. Das Problem

2. Analogien

3. Historische Umwege

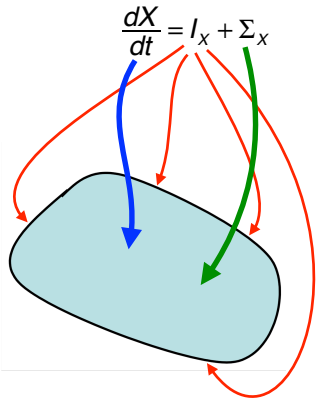
„Ganz besonders liebe ich die Analogien als meine zuverlässigsten Lehrmeister, die um alle Geheimnisse der Natur wissen.“ (Kepler)

„‘Verstehen’, das heißt naiv bloß: etwas Neues ausdrücken können in der Sprache von etwas Altem, Bekanntem.“ (Nietzsche)

„Alles Verstehen beruht auf Analogie.“ (Gödel)

extensive Größen = Basisgrößen

- Masse
- Energie
- elektrische Ladung
- Impuls
- Drehimpuls
- Entropie
- Stoffmenge



$$\frac{dX}{dt} = I_x + \Sigma_x$$

$\frac{dX}{dt}$ Änderungsrate von X

I_x Strom von X

Σ_x Erzeugungsrate X

Falls $\Sigma_x = 0$ ist X eine erhaltene Größe.

$$\frac{dX}{dt} = I_x$$

$$\frac{dX}{dt} = I_x + \Sigma_x$$

$$\frac{dQ}{dt} = I \quad \text{elektrischer Strom}$$

$$\frac{dp}{dt} = F \quad \text{mechanischer Strom („Kraft“)}$$

$$\frac{dE}{dt} = P \quad \text{Energiestrom („Leistung“)}$$

	extensive Größe	intensive Größe	Strom	Energie-strom
Elektrizitätslehre	Q	ϕ	I	$P = U \cdot I$
Mechanik	p	v	F	$P = v \cdot F$
Wärmelehre	S	T	I_S	$P = T \cdot I_S$
Chemie	n	μ	I_n	$P = \mu \cdot I_n$

Die Wärmelehre ist die Analogie zur Elektrizitätslehre und die Chemie die Analogie zur Mechanik.

Wärmelehre mit der Entropie!

Chemie mit dem chemischen Potenzial!

1. Das Problem
2. Analogien
3. Historische Umwege

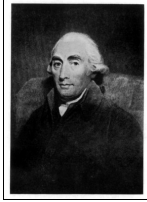
1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

Joseph Black

1728 - 1799 – das erste Mengenmaß für die Wärme

Lectures on the elements of chemistry

Unterscheidet Intensitätsmaß und Mengenmaß



„If, for example, we have one pound of water in one vessel, and two pounds in another, and these two quantities of water are equally hot, as examined by the thermometer, it is evident, that the two pounds must contain twice the quantity of heat that is contained in one pound. But, undoubtedly, we can suppose that a cubical inch of iron may contain more heat than a cubical inch of wood, heated to the same degree; and we cannot avoid being convinced of this by daily experience.“

operationale Definition

1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

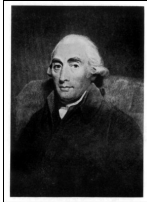
Joseph Black

1728 - 1799 – das erste Mengenmaß für die Wärme

Lectures on the elements of chemistry

Unterscheidet Intensitätsmaß und Mengenmaß

operationale Definition



„The heat producible by the strong friction of solid bodies, occurs often in some parts of heavy machinery, when proper care is not taken to diminish that friction as much as possible...“

Zustandsgröße

1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

Clausius (1822 – 1888) Einführung der Entropie

$$S(2) - S(1) = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$



Es ist nicht zu erkennen, dass sich die Entropie Mengencharakter hat, d.h. dass man eine Bilanzgleichung aufstellen kann;

1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

2. Akt: Wiederauferstehung ohne Konsequenz

3. Akt: Die zweite Wiederauferstehung

2. Akt: Wiederauferstehung ohne Konsequenz

Ostwald 1908 (1853 – 1932)

Die Entropie als wiederauferstandenes Caloricum

Buch: Die Energie (1908)

die Wärmemenge aus der Carnotschen Maschine. Die Größe aus der Wärmelehre aber, welche man mit der Wassermenge vergleichen könnte, ist dem allgemeinen Bewußtsein noch ganz ungewohnt. Sie hat den wissenschaftlichen Namen Entropie erhalten und spielt eine ihrer Bedeutung angemessene Rolle in der Theorie der Wärmeerscheinungen. Aber in die Schule und somit in die Kenntnisse des Durchschnittlich-Gebildeten ist der Gebrauch dieser Größe noch nicht eingedrungen und so muß hier die Nachricht genügen, daß sie wirklich der Wassermenge vergleichbar ist, insofern sie sich beim Durchgang durch die (ideale) Maschine gleichfalls ihrer Menge nach nicht ändert.

2. Akt: Wiederauferstehung ohne Konsequenz

Callendar 1911 (1863 – 1930)



Finally, in 1865, when its importance was more fully recognised, Clausius ... gave it the name of „entropy,” and defined it as the integral of dQ/T . Such a definition appeals to the mathematician only. In justice to Carnot, it should be called caloric, and defined directly by his equation $W = AQ(T - T_0)$, which any schoolboy could understand. Even the mathematician would gain by thinking of caloric as a fluid, like electricity, capable of being generated by friction or other irreversible processes.

2. Akt: Wiederauferstehung ohne Konsequenz

Die Arbeiten von Ostwald und Callendar hatten fast keine Konsequenzen.

1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

2. Akt: Wiederauferstehung ohne Konsequenz

3. Akt: Die zweite Wiederauferstehung

3. Akt: Die zweite Wiederauferstehung

Job 1972



Kannte die Vorgeschichte nicht

Entropie ist das, was man umgangssprachlich Wärme nennt.

Lehrbücher in verschiedenen Sprachen Zeitschriftenartikel

ENDE

1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

Joule, Mayer, Helmholtz Die Wärme wird zur Energie

Helmholtz: *Theorie der Wärme*

„Die materielle Theorie der Wärme muß notwendig die Quantität des Wärmestoffs als konstant ansehen.“

3. Historische Umwege

1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

Sadi Carnot 1796 - 1732 – Wärmekraftmaschine und Wasserrad

Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance

„Wir halten es für nutzlos, hier zu erklären, was die Menge an Kalorikum oder an Wärme ist (denn wir verwenden die beiden Ausdrücke unterschiedslos), noch zu beschreiben, wie diese Mengen mit dem Kalorimeter gemessen werden. Wir werden auch nicht erklären, was latente Wärme, Temperatur, spezifische Wärme usw. ist. Der Leser muss mit diesen Ausdrücken durch das Studium elementarer Abhandlungen über Physik oder Chemie vertraut sein.“

„Nous jugeons inutile d'expliquer ici ce que c'est que quantité de calorique ou quantité de chaleur (car nous employons indifféremment les deux expressions...)“

1. Akt: Die alte Wärme und ihr Untergang

Joule, Mayer, Helmholtz Die Wärme wird zur Energie

Helmholtz: *Theorie der Wärme*

„Nach Carnot's Vorstellung hätte der Körper auf dem Weg AB [Isotherme] eine ebenso große Wärmemenge $Q_1 - Q_0$ aus einem Wärmereservoir R_1 (z.B. dem Kessel der Dampfmaschine) von der Temperatur ϑ_1 aufgenommen, wie er auf dem Weg CD [Isotherme] an ein Wärmereservoir R_0 von der Temperatur ϑ_0 (z.B. den Condensator bei einer Dampfmaschine) wieder abgegeben hätte.

Er schloss daraus, dass Wärme äußere Arbeit erzeugen könne, wenn sie in unveränderter Quantität übergeführt werde von Körpern höherer Temperatur (dem Reservoir R_1) zu einem solchen (R_0) niedriger Temperatur, als ob sie bei höherer Temperatur gewissermaßen einen Zustand größerer elastischer Spannung besitze und sich gleichsam ausdehne, wenn sie auf niedere Temperatur übergehe, wobei die elastische Spannkraft des Wärmestoffes umgewandelt würde in äußere Arbeit.

Carnot's Betrachtung ist richtig insofern als bei diesem Arbeitsgewinn notwendig ein gewisses Wärmequantum übergehen muss aus einem wärmeren zu einem kälteren Körper. Aber sie ist irrig insofern, als keineswegs der den Wärmeübergang vermittelnde arbeitende Körper bei der niederen Temperatur ϑ_0 ebenso viel Wärme abgibt, als er bei ϑ_1 aufgenommen hat; er gibt vielmehr weniger Wärme ab, und zwar ist die Differenz äquivalent der gewonnenen äußeren Arbeit.

2. Akt: Wiederauferstehung ohne Konsequenz

Jaumann 1911 (1863 – 1924) Lokale Bilanzgleichung

ENTROPIEPRINZIP UND GESCHLOSSENES GLEICHUNGSSYSTEM

VON
ERWIN LOHR

VORGELEGT IN DER SITZUNG AM 26. JANUAR 1911

Einleitung.

Zwei Prinzipien von weitestgehender Bedeutung beherrschen die moderne Physik, ja die moderne Naturwissenschaft überhaupt: das Energieprinzip und das Entropieprinzip. Der erste Grundsatz des Prinzipes ist so allgemein und auch den verschiedensten Richtungen hin geachtet worden, daß es fast unermesslich über seinen Gegenstand noch etwas wesentlich Neues sagen zu wollen. Wenn sich es trotzdem vernehmen, die Resultate möglicher Arbeit auf diesem Gebiete in der folgenden Abhandlung zusammenzufassen, so dürfte eine Erklärung dienen, weshalb es mir bei meinen Untersuchungen in erster Linie daran, nicht überflüssig sei.

Es ist bekannt, daß das Energieprinzip lange in seiner integralen Form stecken blieb, weil man sich doch sogar bis zu der Behauptung venturierte: die Menge des „Wärms“ sei konstant. Heute ist die Form der Energieprinzip, vorzüglich durch die Arbeiten G. Jaumann's zur Differentialform durchgedrungen. Demselben Punkte verhalten wir auch die in zwei Einheiten und Vollständigkeit zu messende Formulierung der Entropiegleichung:

$$\frac{dS}{dt} + \text{div } \mathbf{S} = 0,$$

wo S die gesamte Entropie pro Volumeneinheit, \mathbf{S} den Entropiestrom pro Flächen- und Zeiteinheit bedeutet. Derselbe Entropiestrom, welchen das Energieprinzip schon richtiggestellt hat, wird dem Energieprinzip auch heute wieder wie es G. Jaumann, der in seiner Arbeit „Geschlossenen System physikalischer und chemischer Differentialgleichungen“ im ersten Buche in dieser Richtung hat. Auch die, nurmehr selbständige, der Energiegleichung analoge Formulierung der Entropiegleichung:

$$\frac{dS}{dt} + \text{div } \mathbf{S} - F = 0,$$

wo S die Entropie pro Volumeneinheit, \mathbf{S} den Entropiestrom pro Flächen- und Zeiteinheit und F eine neue positive Funktion bedeutet, ist schon in der letzten Arbeit von Jaumann, im vierten Buche, S. 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

Prinzipien ist so ungemein viel und nach den verschiedensten Richtungen hin gearbeite worden, daß es fast vermessen erscheint, über solchen Gegenstand noch etwas wesentlich Neues sagen zu wollen. Wenn ich es trotzdem unternehme, die Resultate mehrjähriger Arbeit auf diesem Gebiete in der folgenden Abhandlung zusammenzufassen, so dürfte eine Präzisierung dessen, worauf es mir bei meinen Untersuchungen in erster Linie ankam, nicht überflüssig sein.

Es ist bekannt, daß das Energieprinzip lange in seiner Integralform stecken blieb, hatte man sich doch sogar bis zu der Behauptung verstiegen: die Energie des »Weltalls« sei konstant. Heute ist die Fassung des Energieprinzips, vorzüglich durch die Arbeiten G. Jaumann's, zur Differentialform durchgedrungen. Diesem Forscher verdanken wir auch die in ihrer Einfachheit und Vollendung klassisch zu nennende Formulierung der Energiegleichung:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \text{div } \mathfrak{E} = 0,$$

wobei E die gesamte Energie pro Volumeneinheit, \mathfrak{E} den Energiefluß pro Flächen- und Zeiteinheit bedeutet.

Dieselbe Entwicklung, welche das Energieprinzip schon durchgemacht hat, stand dem Entropieprinzip noch bevor. Wieder war es G. Jaumann, der in seiner Arbeit »Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze«¹ den ersten Schritt in dieser Richtung tat. Auch die, nunmehr naheliegende, der Energiegleichung analoge Formulierung des Entropiesatzes:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div } \mathfrak{S} - F = 0,$$

wobei S die Entropie pro Volumeneinheit, \mathfrak{S} den Entropiefluß pro Flächen- und Zeiteinheit und F eine stets positive Funktion bedeutet, ist schon in der zitierten Arbeit zu finden. Es ist natürlich kein Zufall, daß

¹ Wiener Berichte CXX, Abt. II a, p. 509 u. f.
Denkschriften der mathem.-naturw. Klasse, 93. Band.

ips, vorzüglich durch die Arbeiten G. Jaumann's, zur Differentialform durchgedrungen. Diesem Forscher verdanken wir auch die in ihrer Einfachheit und Vollendung klassisch zu nennende Formulierung der Energiegleichung:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \text{div } \mathfrak{E} = 0,$$

wobei E die gesamte Energie pro Volumeneinheit, \mathfrak{E} den Energiefluß pro Flächen- und Zeiteinheit bedeutet.

Dieselbe Entwicklung, welche das Energieprinzip schon durchgemacht hat, stand dem Entropieprinzip noch bevor. Wieder war es G. Jaumann, der in seiner Arbeit »Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze«¹ den ersten Schritt in dieser Richtung tat. Auch die, nunmehr naheliegende, der Energiegleichung analoge Formulierung des Entropiesatzes:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div } \mathfrak{S} - F = 0,$$

wobei S die Entropie pro Volumeneinheit, \mathfrak{S} den Entropiefluß pro Flächen- und Zeiteinheit und F eine stets positive Funktion bedeutet, ist schon in der zitierten Arbeit zu finden. Es ist natürlich kein Zufall, daß

¹ Wiener Berichte CXX, Abt. II a, p. 509 u. f.